

V 5.1 *Reibwertreduktion durch gezielte Makrostrukturierung der Oberfläche von Reibsystemen mit Kunststoffbeteiligung*

Referent: Dipl.-Ing. André Bergmann,
Dipl.-Ing. Tobias Weisbach,
Dr.-Ing. Ralf Bartsch,
Dr.-Ing. Jens Sumpf,
Professur Fördertechnik / TU Chemnitz, Deutschland

1 Einleitung

Die Reduktion von Reibwerten hat für viele technische Bereiche große Relevanz, denn überall da, wo Massen bewegt, oder in Bewegung versetzt werden, sorgt Reibung für Energieverluste. Im Bereich der Fördertechnik werden über teils lange Distanzen verschiedenste Güter wie z. B. Getränkeflaschen, Kartonagen, Werker an Fertigungsstraßen etc. (siehe Abbildung 1) transportiert und jegliche Verluste müssen durch eine gesteigerte Antriebsleistung der Förderstränge ausgeglichen werden. Neben den energetischen Verlusten führt der durch Reibung verursachte Bewegungswiderstand zu einer Limitierung der Förderlänge bzw. der Anzahl zu transportierender Güter. Dabei werden Kettenelemente einer Zugbelastung ausgesetzt, die in Abhängigkeit des Kettenmaterials (Stahl oder Kunststoff) bei entsprechende hoher Belastung zum Kettenbruch führen können.



Abbildung 1: (links) Getränketransportanlage [Quelle Krones] (rechts) Werkermitfahrband [Quelle VW]

Diesbezüglich wurden und werden am Institut für Fördertechnik und Kunststoffe Reibpaarungen mit Kunststoffbeteiligung untersucht. Der Fokus liegt dabei auf Kunststoff-Kunststoff-Paarungen, welche beispielsweise in raumgängigen Förderketten vorkommen. Schematisch in Abbildung 2 dargestellt, werden diese meist in Profilen geführt, die mit einer Gleitleiste aus Kunststoff bestückt sind. Entsprechend der Geometrie von Tragplatte und Gleitleiste bildet sich ein Kontaktbereich aus, auf dem das zu transportierende Gut abgestützt wird.

Stand der Technik ist die gezielte Auswahl von Reibpaarungen, also Ketten- und Gleitleistenmaterial, wobei für Ketten meist technische Kunststoffe der Gruppen POM, PBT oder PA und für Gleitleisten sehr häufig PE-UHMW's verwendet werden. Mit dem Ziel Reibung und Verschleiß zu reduzieren, werden nahezu all diese

Werkstoffe mit verschiedenen Gleitadditiven wie Wachsen, PTFE oder Silikonöl versehen.

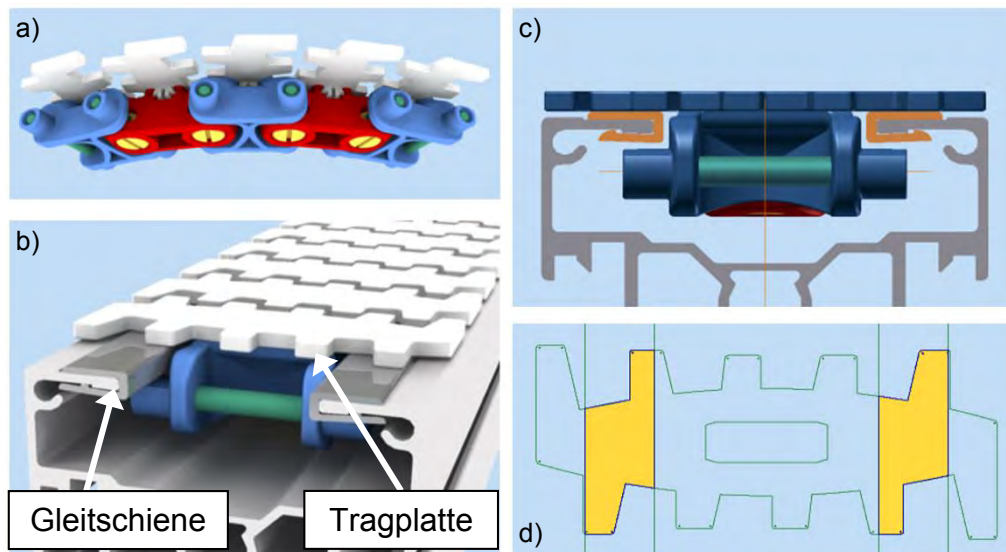


Abbildung 2: a) Raumbewegliche Gleitkette b) Abstützung der Kette im Alu-Profil mit Kunststoff-Gleitschiene c) Querschnitt Kettenprofil d) Kontaktbereich (gelb) zwischen Kette und Gleitschiene unter Wirkung der Fördergutlast

Neben Untersuchungen zur Wirkungsweise dieser Additive wurde am Institut der Einfluss strukturierter Oberflächen betrachtet. Dabei wurden die potenziellen Kettenwerkstoffe mit minimalen Strukturen versehen (bis 0,1 mm) und gegen glatte PE-UHMW Gleitleisten getestet. Unterschieden wurden die Strukturen hinsichtlich ihrer Art: periodische Profile mit widerkehrenden Strukturen [1] und aperiodische Profile, wie Erodier- oder Ätzstrukturen [2], [3]. Unabhängig von der Profilart konnten damit Reibwertreduktion von 50% bei gleichzeitiger Verschleißminimierung nachgewiesen werden. Auch in Langzeituntersuchungen von mind. 168 h konnten diese positiven Effekte bestätigt werden.

Um den maßgeblichen Einfluss der Kontaktfläche näher zu ergründen, wurde der Ansatz mit Mikrostrukturen weiterverfolgt und vereinfacht. Durch die Verwendung von einzelnen Kugeln ($\varnothing 5 - 16 \text{ mm}$), lassen sich die reale Kontaktfläche und evtl. auftretende Verschleißphänomene besser vermessen und Einflüsse der Normalkraft und damit der sich ausbildenden Pressung reproduzierbar abbilden.

2 Versuchsaufbau

Für die Reibwertuntersuchungen wurde ein eigens entwickeltes, oszillierendes Tribometer verwendet [4]. Dieses gestattet die Bestückung mit verschiedenen bewegten Probekörpern (Block, Kugel), die auf einer an einem Messtisch fest eingespannten Unterprobe gleiten (Abbildung 3). Dabei sind der Hub, die mittlere Geschwindigkeit und die Normalkraft variabel einstellbar. Reibwert, Temperatur in der Kontaktzone und die Normalkraft können damit in verschiedenen Messintervallen über lange Versuchsdauern aufgezeichnet werden.

Die Testparameter für die im Folgenden vorgestellten Untersuchungen sind:

- Hub: 100 mm
- mittlere Gleitgeschwindigkeit: 0,01 m/s - 0,7 m/s
- Versuchsdauer: 24 h
- Reibwert: gemittelt zwischen 22 und 24 Versuchsstunden

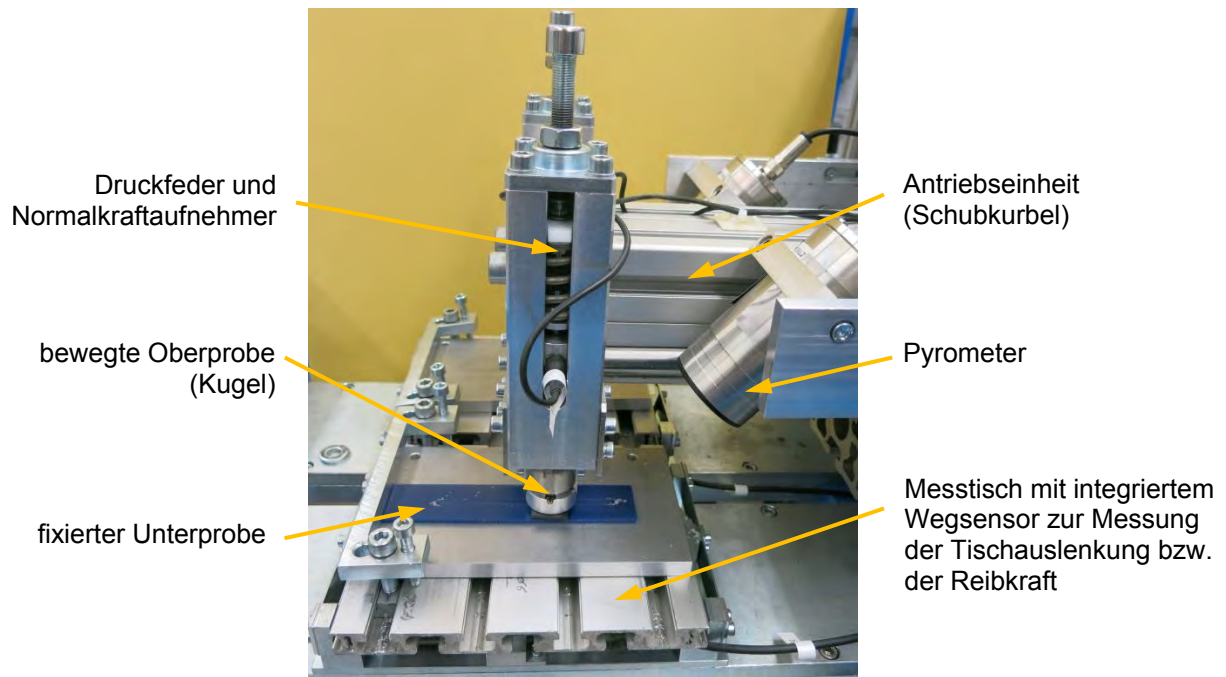


Abbildung 3: oszillierender Reib- und Verschleißprüfstand mit Temperaturmesseinheit

Der Halter für verschiedene Kugeln sowie eine Gleitschiene mit zwei exemplarischen Laufspuren sind in Abbildung 4 dargestellt.

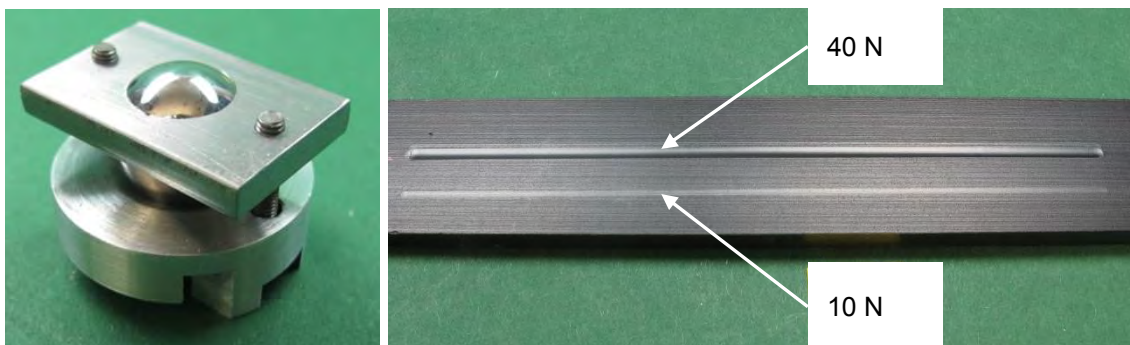


Abbildung 4: links) Kugelhalter mit Kugel (Oberprobe); rechts) Schiene (Unterprobe) mit Laufspuren nach Reibtest bei zwei verschiedenen Normalkräften

Als auf dem Messtisch fixierte Unterprobe wurden folgende Werkstoffe gewählt:

- PE-HD (ohne Additive) Polystone® G Natur (Fa. Röchling)
- PE-UHMW (ohne Additive) Polystone® M Natur (Fa. Röchling)
- PE-UHMW (mit Additiven) Original Werkstoff "S"® Schwarz Antistatisch (Fa. Murtfeldt)
- PE-UHMW (mit Additiven) LubX® CV (Fa. Röchling)
- POM-C Hostaform® C9021 (Fa. Ticona)
- PP-H Borealis HF955MO (Fa. Borealis)
- PE-HD (spritzgussfähig) Total HD-PE 56020 S

Als Kugelwerkstoffe (Oberproben) wurden folgende verwendet:

- Stahl 100Cr6 gehärtet; Ø 8 mm
- Polyamid 66; Ø 8 mm

3 Experimentelle Ergebnisse

3.1 Variation der Normalkraft

Die folgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse der Reibexperimente unter Variation der Normalkraft $F_N = 10 - 280$ N. Die dargestellten Werte wurden zwischen 22 – 24 h Versuchsdauer gemittelt, wobei mindestens zwei Versuche pro Reibpaarung durchgeführt wurden.

In Abbildung 5 sind die Kurvenverläufe von Stahl 100Cr6 Kugeln gegen diverse Kunststoffe dargestellt. Das Absinken des Reibwertes fällt insbesondere bei kleinen Kräften von 10 bis 40 N sehr deutlich aus. In Abhängigkeit der Paarung werden Reibwertreduktionen von 40% erzielt. Die Gruppe der PE-UHMW zeichnen sich hier durch besonders niedrige Reibwerte unterhalb von $\mu = 0,15$ (ab $F_N = 40$ N) aus.

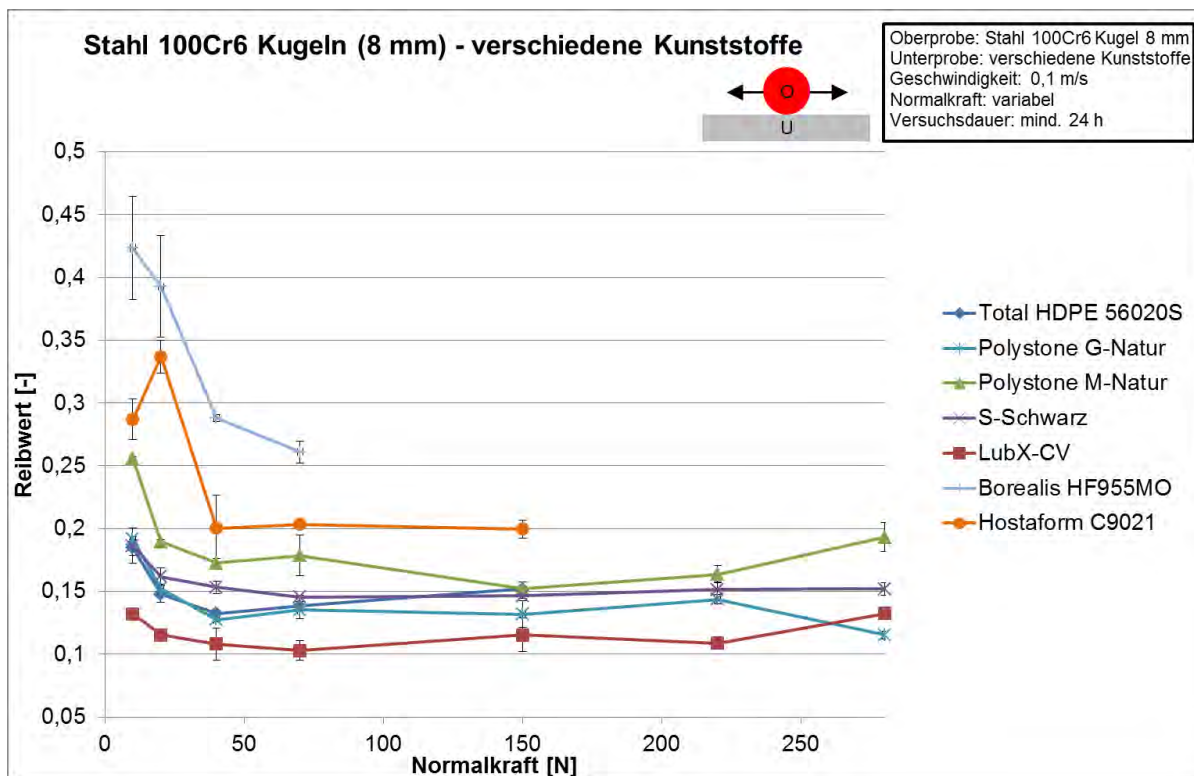


Abbildung 5: gemittelte Reibwerte (zwischen 22 – 24 h) in Abhängigkeit der Normalkraft von Stahlkugel 100Cr 6 (8 mm) – verschiedene Kunststoffe

In Abbildung 6 sind die Ergebnisse unter Verwendung von PA 66 Kugeln dargestellt. Zunächst fällt auf, dass bei allen untersuchten Gegenwerkstoffen geringere Reibwerte als gegen Stahl 100Cr6 Kugeln ermittelt wurden. Es liegt ein ähnlich starkes Absinken des Reibwertes im Bereich geringer Normalkräfte vor. Im Anschluss durchläuft der Reibwert bei etwa $F_N = 150$ N ein Minimum und steigt schließlich mit zunehmender Normalkraft wieder leicht an. Die mögliche Reibwertreduktion liegt bei bis zu 60%.

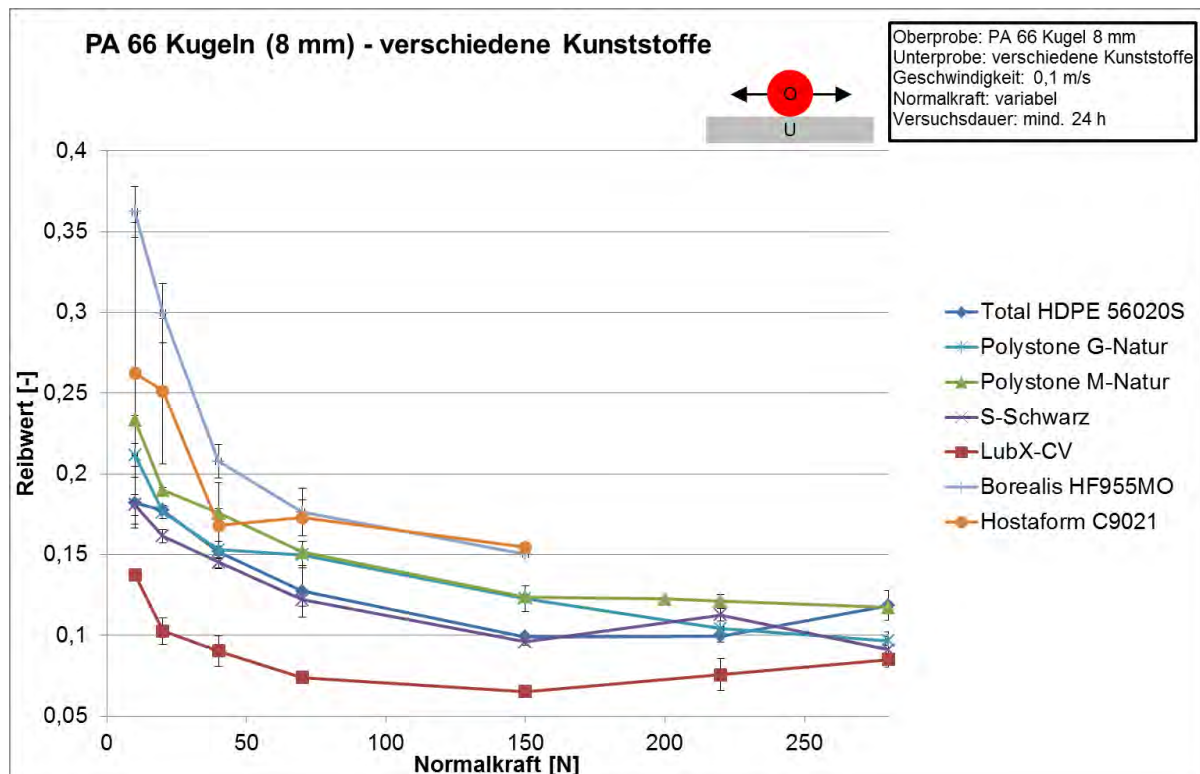


Abbildung 6: gemittelte Reibwerte (zwischen 22 – 24 h) in Abhängigkeit der Normalkraft von PA 66 Kugeln (8 mm) – verschiedene Kunststoffe

Folgende Abbildung 7 zeigt die Ergebnisse der verschiedenen PE-UHMW gegen den Kugelwerkstoff POM. Die Reibwerte liegen dabei auf ähnlichem Niveau wie bei PA-Kugeln, jedoch findet kein Anstieg im hohen Kraftbereich statt. Die erzielbare Reibwertreduktion liegt ebenfalls bei mehr als 50%.

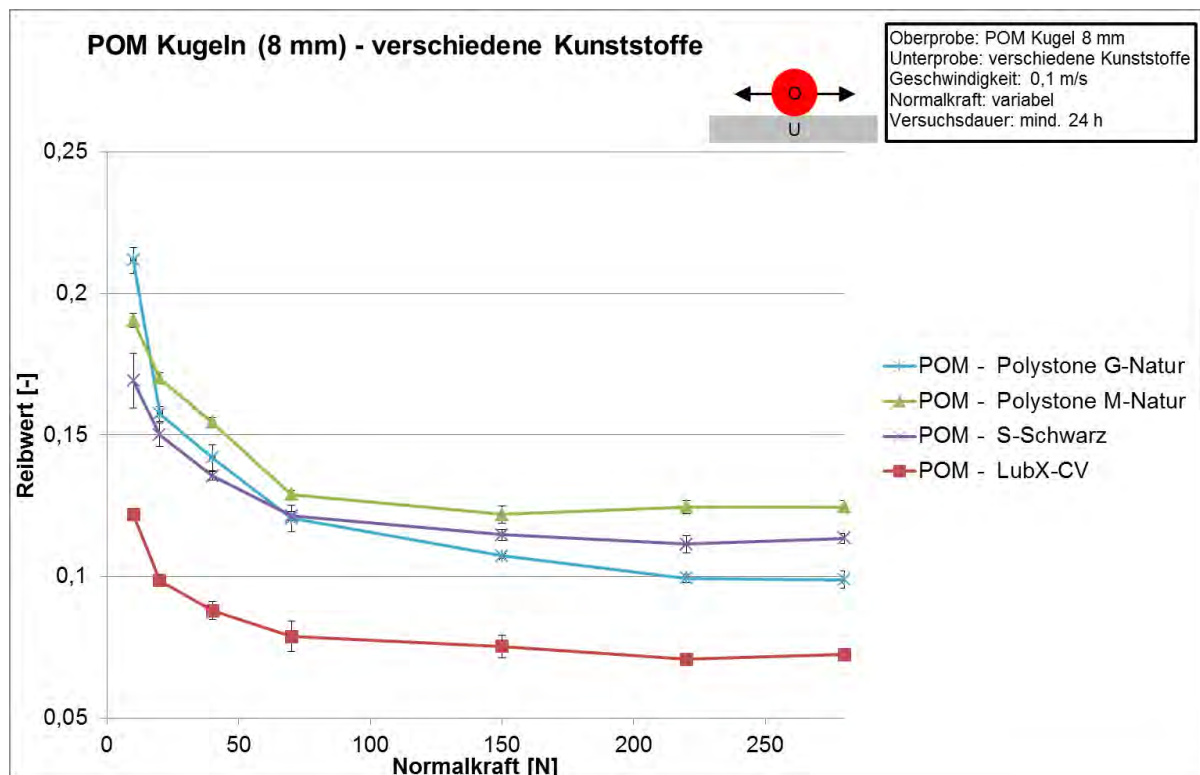


Abbildung 7: gemittelte Reibwerte (zwischen 22 – 24 h) in Abhängigkeit der Normalkraft von POM Kugeln (8 mm) – verschiedene Kunststoffe

Der Verschleiß unterscheidet sich zwischen den verschiedenen Werkstoffen sehr stark. Alle PE-UHMW-Werkstoffe weisen die Ausbildung verschieden tiefer Laufspuren in Abhängigkeit der Normalkraft auf, die lediglich auf plastische Deformation zurückgeführt werden können. Ein Partikelabrieb liegt nicht vor.

In folgender Abbildung 8 sind exemplarisch für alle Kugelwerkstoffe gegen die verschiedenen PE-UHMW Werkstoffe (im Beispiel S-Schwarz) die Verschleißbilder nach 24 h Versuchsdauer aufgeführt. Dabei ist ersichtlich, dass die durch den Kugelkontakt hervorgerufene Laufspur in ihrer Dimension mit zunehmender Normalkraft größer wird. An den Kugeln (hier POM-Kugeln) bildet sich eine Kontaktkalotte aus, die durch minimale Polierspuren und Glanzunterschiede auf die reale Kontaktfläche schließen lässt.















Unterprobe	Oberprobe	Normalkraft
		10 N
		20 N
		40 N
		70 N
		150 N
		220 N
		280 N

Abbildung 8: Ausgebildete Laufspur an PE-UHMW Unterproben (hier S-Schwarz) und Kontaktkalotte an POM-Kugeln nach 24 h Reibtest mit $v = 0,1$ m/s und variabler Normalkraft

Der Verschleiß der spritzgussfähigen Unterproben-Werkstoffe fällt dagegen deutlich stärker aus. Einige Experimente im hohen Normalkraftbereich konnten deswegen verschleißbedingt nicht durchgeführt werden. In Abbildung 9 sind exemplarische Proben nach 24 h Versuchsdauer dargestellt. Neben Partikelabrieb und ungleichmäßig ausgeprägten Laufspuren an der Unterprobe sind auch Verschleißspuren an den Kunststoffkugeln zu erkennen. Hier liegen Aufschmelzungen im Bereich der Kontaktzone bzw. ebenfalls Partikelabrieb vor.







Unterprobe	Oberprobe	Normalkraft
Total HD-PE 56020S 	PA 	70 N
Borealis HF955MO 	Stahl 100Cr6 	70 N
Hostaform C9021 	PA 	150 N

Abbildung 9: Ausgebildete Laufspur an Unterproben und Kontakthalotte/Verschleiß an Kugelwerkstoffen nach 24 h Reibtest mit $v = 0,1 \text{ m/s}$ und variabler Normalkraft

3.2 Variation der Gleitgeschwindigkeit

Der Einfluss der Gleitgeschwindigkeit konnte am Prüfstand im Bereich von $0,01 - 0,7 \text{ m/s}$ untersucht werden. Für die Experimente wurde das nicht additivierte PE-UHMW Polystone M-Natur und eine konstante Normalkraft von $F_N = 70 \text{ N}$ gewählt.

Die Ergebnisse unterscheiden sich hierbei hinsichtlich der Kugelwerkstoffe deutlich. Bei Stahl 100Cr6 Kugeln (Abbildung 10) bewegt sich der Reibwert in einem Band von $\mu = 0,15 \dots 0,18$. Eine Tendenz ist nicht zu erkennen. Die ermittelte Temperatur steigt hingegen linear mit zunehmender Geschwindigkeit auf max. 51°C (bei $0,5 \text{ m/s}$) an.

Werden PA 66 Kugeln (Abbildung 11) eingesetzt sinkt der Reibwert kontinuierlich von $\mu = 0,16$ auf $\mu = 0,11$ mit zunehmender Geschwindigkeit. Die Temperatur steigt dabei stetig auf max. 61°C (bei $0,5 \text{ m/s}$) und liegt somit 20% höher als bei Stahlkugeln. Dies kann durch die um Faktor 100 niedrigere Wärmeleitfähigkeit von PA 66 ($\lambda = 0,23 \text{ W/mK}$) gegenüber Stahl 100Cr6 ($\lambda = 30 \text{ W/mK}$) erklärt werden.

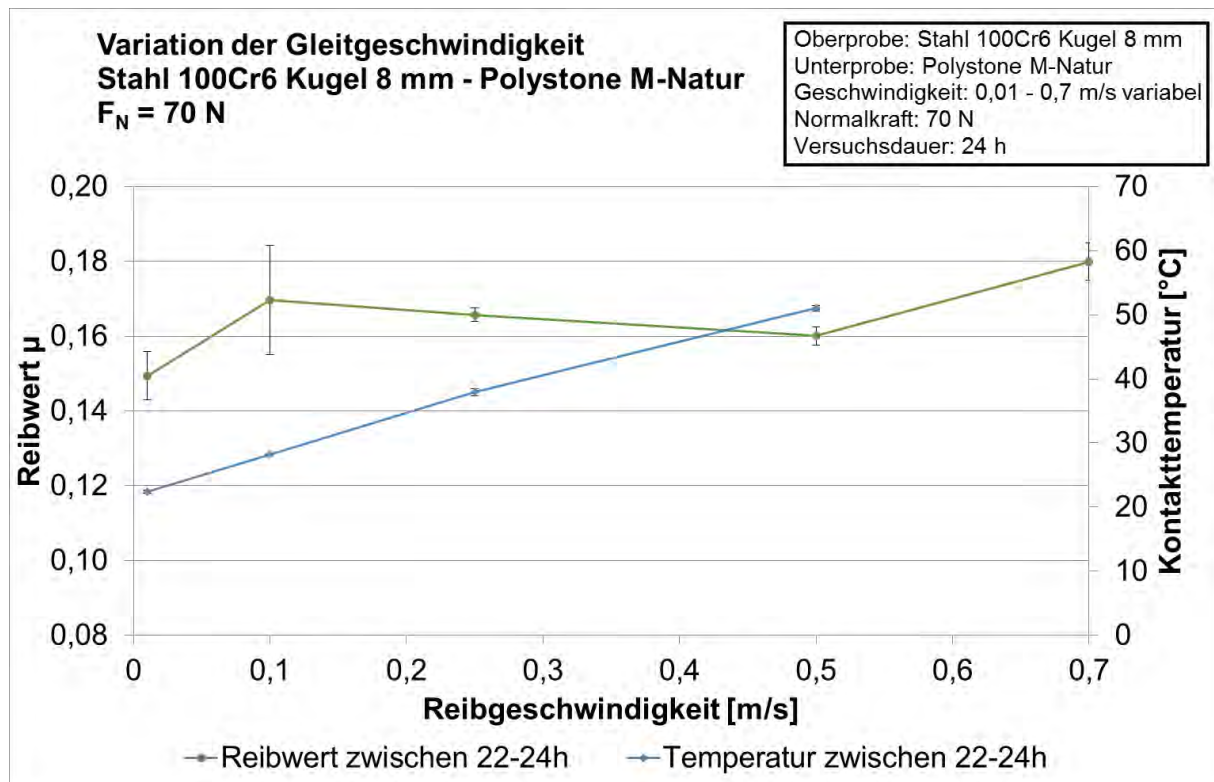


Abbildung 10: Reibwert und Kontakttemperatur in Abhängigkeit der Gleitgeschwindigkeit;
 Kugelwerkstoff Stahl 100Cr6

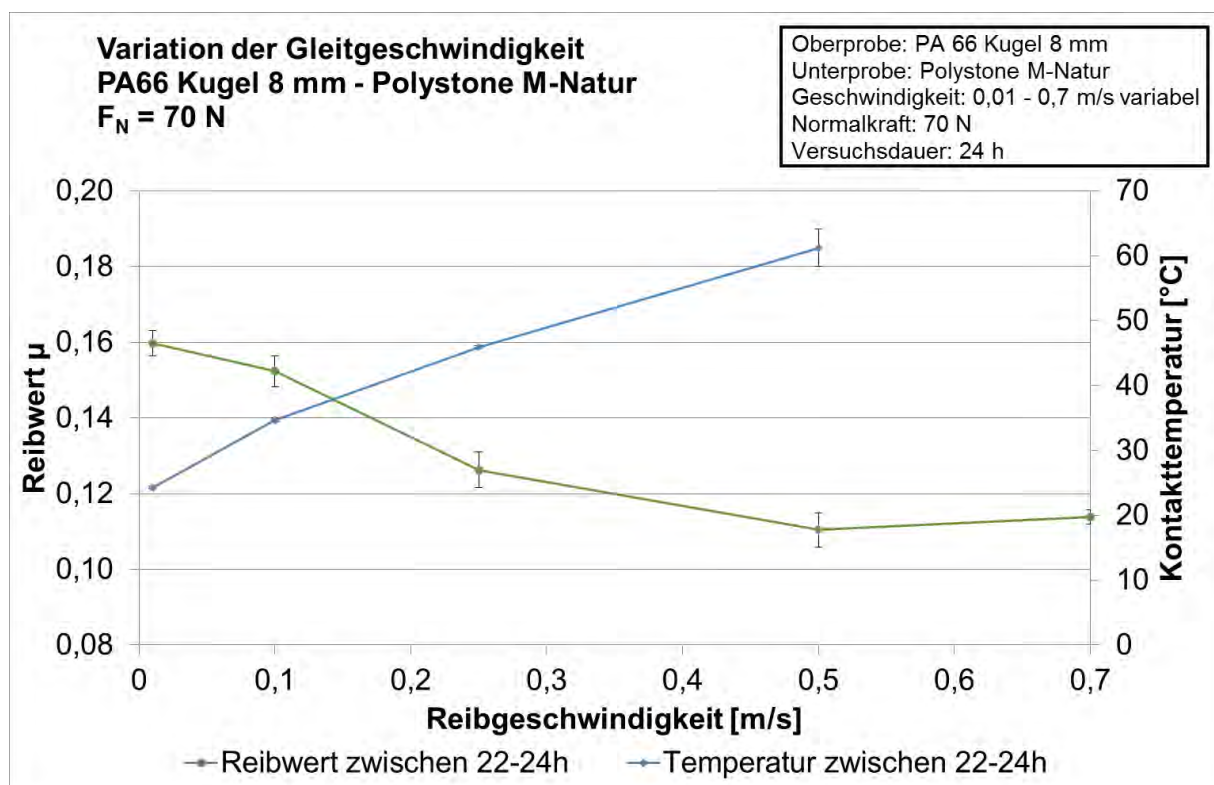


Abbildung 11: Reibwert und Kontakttemperatur in Abhängigkeit der Gleitgeschwindigkeit;
 Kugelwerkstoff PA 66

3.3 Einfluss deformativer und adhäsiver Reibanteile

Um eine Abschätzung zum Anteil adhäsiver und deformativer Reibkomponenten am gesamten Reibwert zu ermitteln, wurde zwischen den beiden Reibpartnern ein trennender Schmierfilm (Silikonöl) aufgebracht. Dieser Ansatz wurde bereits an Elastomeren verfolgt [5], wobei davon ausgegangen wird, dass durch den Schmierfilm die Adhäsion zwischen den Körpern nahezu eliminiert werden kann und nur deformative Reibanteile vorliegen. Gestützt wird die These durch den Reibwertverlauf bei sehr geringen Geschwindigkeiten (siehe Abbildung 12). Hier ist der deformative Anteil sehr klein und der adhäsive Anteil dominiert den gesamten Reibwert.

Formal lässt sich der Reibwert durch folgende Gleichung beschreiben:

$$\mu_{ges} = \mu_{adh} + \mu_{def}$$

Sind zwei Kennwerte bekannt (μ_{ges} = Reibwert ohne Schmierung; μ_{def} = Reibwert mit Schmierung) ermöglicht dies die Berechnung des adhäsiven Reibanteils μ_{adh} .

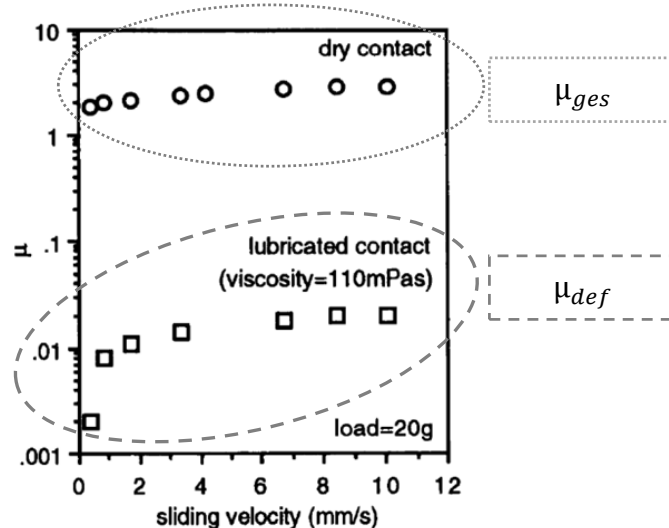


Abbildung 12: Reibwert im trockenen und geschmierten Kontakt eines Elastomers und einer konkaven Linse [5]

In Abbildung 13 und Abbildung 14 sind die Ergebnisse mit den Kugelwerkstoffen Stahl und PA 66 dargestellt. Es fällt auf, dass der Reibwert im geschmierten Zustand sehr niedrig ist und bei beiden Kugelwerkstoffen etwa auf gleicher Höhe liegt. Weiterhin liegt im geschmierten Zustand kaum ein Einfluss der Gleitgeschwindigkeit als auch der Normalkraft vor. Demnach ist zwischen $v = 0,01 - 0,25$ m/s (Faktor 25) und $F_N = 40 - 280$ N der deformative Reibanteil relativ konstant ($\mu_{def} \approx 0,04$).

Betrachtet man die Werte der ungeschmierten Paarung, welche die Summe aus deformativen und adhäsiven Reibanteilen darstellen, ergeben sich deutliche Unterschiede zwischen den Werkstoffen. Wie bereits in Abschnitt 3.1 beschrieben, sinkt der Reibwert bei PA 66 Kugeln deutlich mit Steigerung der Normalkraft ab. Dies beinhaltet die Abnahme des adhäsiven Reibanteils μ_{adh} mit zunehmender Normalkraft. Ebenso liegt bei PA 66 im gewissen Umfang eine Geschwindigkeitsabhängigkeit des adhäsiven Anteils vor: Je höher die Geschwindigkeit, desto niedriger der adhäsive Reibanteil. Dies kann durch die Zeitabhängigkeit der Ausbildung von Adhäsionsbindungen begründet werden. Aufgrund des viskoelastischen Werkstoffverhaltens (Kriechen) ist die Kontaktfläche eine zeitlich veränderliche Größe und demzufolge abhängig von der Kontaktzeit.

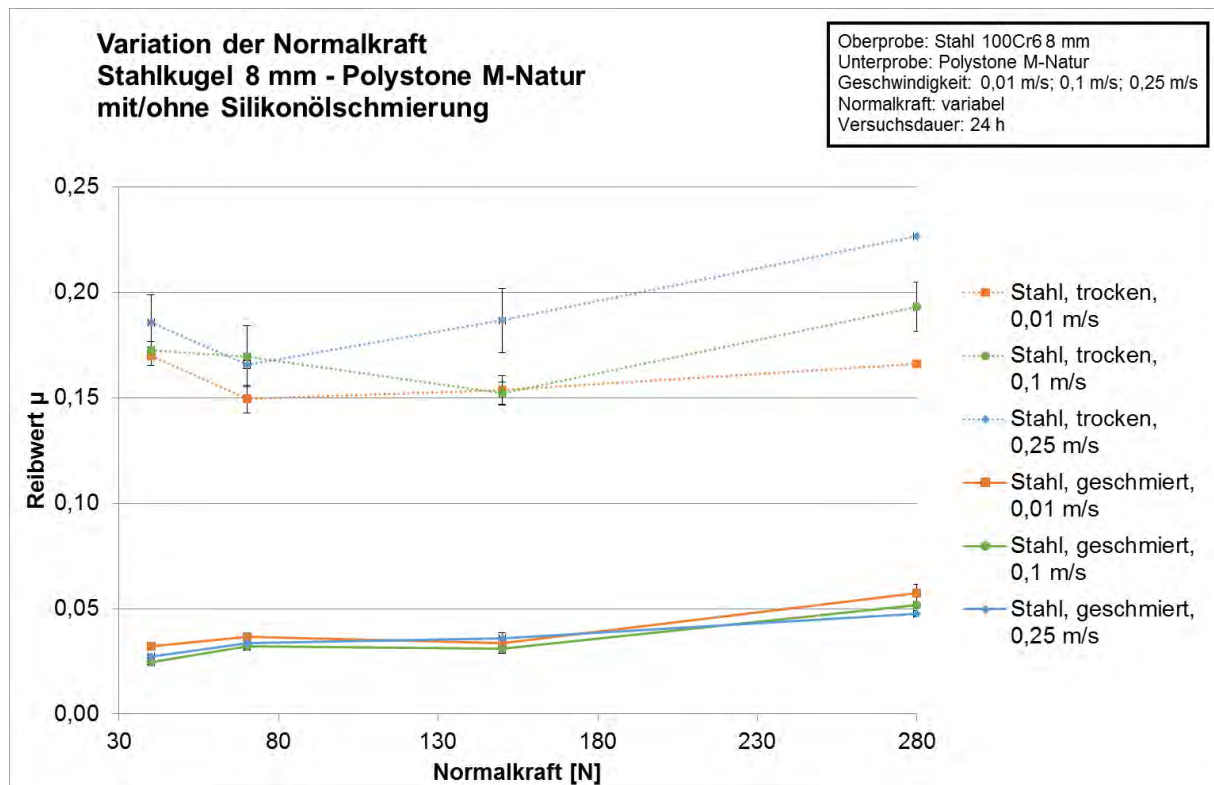


Abbildung 13: Reibwerte im trockenen und geschmierten Kontakt von einer Stahl 100Cr6 Kugel (8 mm) im Kontakt mit Polystone M-Natur

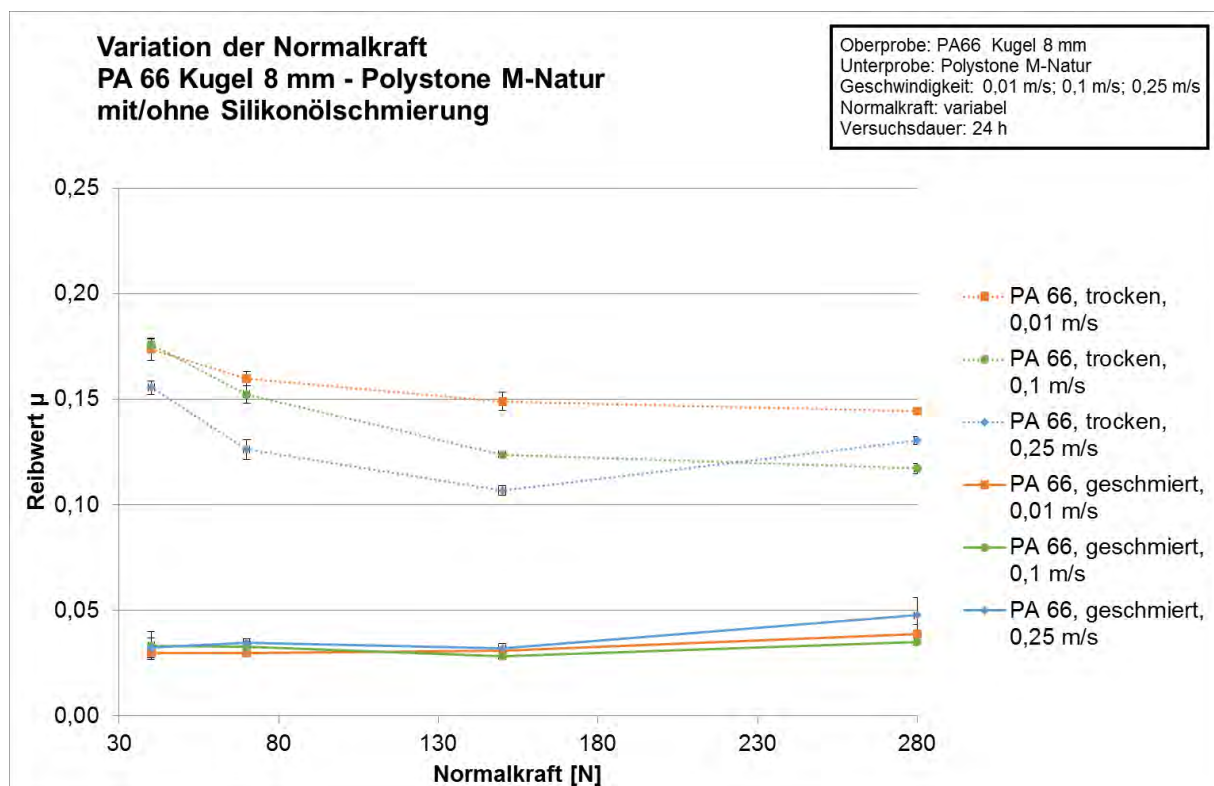


Abbildung 14: Reibwerte im trockenen und geschmierten Kontakt von einer PA66 Kugel (8 mm) im Kontakt mit Polystone M-Natur

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die durchgeführten Experimente zeigen für alle untersuchten Stahl-Kunststoff- und Kunststoff-Kunststoff-Paarungen eine sinkende Tendenz des Reibwertes bei Normalkrafterhöhung. Besonders im Lastbereich von $F_N = 10 - 70 \text{ N}$ fällt diese Reduktion sehr stark aus (bis 50%).

Verschleißbedingt eignen sich jedoch für diese hohen lokalen Spannungen und Verformungen fast ausschließlich PE-UHMW Werkstoffe. Da bereits ab $F_N = 10 \text{ N}$ bei allen Werkstoffen ein Überschreiten der Streckgrenze stattfindet und damit plastische Deformation vorliegt, sind nur verschleißbeständige und wenig spröde Werkstoffe für diese Bedingungen geeignet. PP und POM neigen hingegen zu fortschreitenden abrasiven Partikelverschleiß.

Anhand eines unadditivierten PE-UHMW wurden Versuche zur Geschwindigkeitsabhängigkeit des Reibwertes durchgeführt. Dabei konnte bei Verwendung von PA 66 Kugeln eine Reibreduktion von 30% bei hohen Geschwindigkeiten von 0,7 m/s im Vergleich zu 0,01 m/s erzielt werden.

Weiterhin geben die durchgeführten Experimente mit geschmierten Reibpaarungen Aufschluss über den Einfluss adhäsiver und deformativer Anteile am gesamten Reibwert. Lediglich $\approx 25\%$ werden durch Deformation und $\approx 75\%$ durch Adhäsion bestimmt.

Die Untersuchungen haben somit das enorme Potenzial der Reibwertreduktion durch eine gezielte Wahl der Normalkraft und Geschwindigkeit anhand von kugelförmigen Probekörpern aufgezeigt. Im Vergleich zu Kunststoff-Kunststoff-Paarungen mit flächigen Probenkörpern, deren Reibwerte im Bereich $\mu \approx 0,3$ liegen, sind Reduktionen von 60% ohne jegliche werkstofftechnische Änderungen möglich.

Für das weitere Verständnis sind nähere Untersuchungen zum wärme- und zeitabhängigem mechanischen Werkstoffverhalten nötig. Dies wird als ausschlaggebend für die Ausbildung der Kontaktfläche und demzufolge für die Höhe des adhäsiven Reibanteils betrachtet.

Für die technische Umsetzung in z. B. Kunststoffgleitlagern oder -förderketten ist die Verkleinerung des Reibkontaktes (bzw. Kugeldurchmessers) vorgesehen. Dadurch sollen Lagetoleranzen zwischen den Gleitelementen reduziert werden. Derzeit liegt die Annäherung beider Körper durch die plastische Deformation im Bereich bis 1,5 mm, was für eine große Anzahl an Anwendung eine zu grobe Toleranz darstellt. Angestrebt werden Verformungen unterhalb 0,1 mm. Weiterhin soll durch die Verwendung von mehreren in Kontakt befindlichen Kugeln (Mehrkugelsystem) die geometrische Stabilität der Gleitelemente gewährleistet werden.

Literatur

- [1] Schumann, A.; Weise, S.; Sumpf, J.; Nendel, K.: Oberflächenstrukturen zur Reibungs- und Verschleißreduzierung von Kunststoff-Kunststoff-Reibpaarungen in Förderanlagen. Tagungsband zur 52. Tribologie-Fachtagung (26.-28.09.2011) der Gesellschaft für Tribologie in Göttingen, Band 1, S. 5/1-5/13, ISBN 978-3-00-035439-7.
- [2] Bergmann, A.; Sumpf, J.; Bartsch, R.; Weise, S.; Faust, K.; Illek, R.: Tribologische Untersuchung und Beurteilung fördertechnisch relevanter polymerer Werkstoffe. Tagungsband zur 23. Fachtagung über Verarbeitung und Anwendung von Polymeren. Chemnitz, 2013. ISBN 978-3-939382-11-9.

- [3] Bergmann, A.: Einfluss von verschiedenen Erodierstrukturen auf den Reibwert von Kunststoff-Kunststoff Paarungen. Forschungsbericht, <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-216111>, 2016
- [4] Sumpf, J.; Schumann, A; Weise, S.; Nendel, K.; Eichhorn, S.: Neues Prüfverfahren zur Reibungs- und Verschleißbewertung von Kunststoff-Gleitpaarungen. Tribologie und Schmierungstechnik 58 (2011), Heft 4, S. 47-50.
- [5] Rodriguez, P.: Contact and Friction in Systems with Fibre Reinforced Elastomers; University of Twente; Dissertation 2012